



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND
ELECTRICAL ENGINEERING -
DEVICES AND SYSTEMS,
MATERIALS AND TECHNOLOGIES
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische
Angelegenheiten
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Susanne Jakob
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):
Universitätsbibliothek Ilmenau
[ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

A. W. Pavlenko., W. P. Grinchenkow, A. A. Gummel, J. Baumbach, E. Kallenbach

Algorithmus zur adaptiven Steuerung schnell-wirkender elektro-magnetischer Antriebe mit vorgegebenen dynamischen Parametern

Vorgegebene dynamische Charakteristiken elektromagnetischer Antriebe (EMA) können realisiert werden, sowohl durch eine entsprechende Konfiguration und geometrische Auslegung des magnetischen Kreises als auch mit Hilfe eines elektronischen Steuersystems. Die Projektierung solcher Systeme bedarf eines mechatronischen Entwurfs, der die Optimierung der Konstruktion als auch die Synthese der Parameter der Steuersignale beinhaltet und ein globales Optimum des Gesamtsystems anstrebt. [1,2,3].

Elektro-magnetische Resonanzantriebe für die Steuerung des Luftstromes in Verbrennungsmotoren arbeiten unter extremen Bedingungen, z.B. bei hohen Umgebungstemperaturen, starken Vibrationen, äußeren veränderlichen Belastungen auf das Stellglied, Erwärmung der Torsionsfeder, die das dynamische Verhalten des Magnetaktors während des zyklischen Arbeitsprozesses des Antriebes stark beeinflussen können.

Bei Verwendung entsprechender Sensoren ist die Steueraufgabe für den Umschaltprozess des Elektromagneten ohne Schwierigkeiten mit den Hard- und Softwarelösungen moderner Mikrocontroller zu realisieren. Zur Erhöhung der Funktionssicherheit elektro-magnetischer Antriebe wird jedoch eine Reduzierung der Anzahl der Elemente angestrebt, darunter auch der Sensoren für die Lage und Geschwindigkeit des bewegten Ankers. Deshalb besteht der Wunsch zur Entwicklung von sensorlosen Steuerungsmethoden.

Für den mechatronischen Entwurf von EMA sind in der Vergangenheit mehrere mathematische Modelle zur Analyse und Synthese des Magnetaktors gemeinsam mit der Steuereinrichtung entwickelt worden [4].

Die mathematischen Modelle, realisiert auf der Basis des Programmpakets „DesignLab“, wurden für die Berechnung der dynamischen Prozesse in elektro-magnetischen Systemen angepasst, wobei zusätzliche Modellbibliotheken erarbeitet wurden. Die

Modellierung wurde mit dem Programm „Maxwell Schematic Capture“ durchgeführt, das die Modellierung elektro-magnetischer Antriebe einschließlich des Steuersystems erlaubt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Bestimmung der dynamischen Charakteristiken des Elektromagneten und die Synthese der Parameter der Steuersignale, welche die notwendigen Änderungsgesetze für die Magnetkraft während des Umschaltprozesses, die gewünschte Ankerendgeschwindigkeit, die notwendige Umschaltzeit usw. gewährleisten. Als Ergebnis der mathematischen Modellierung und der Untersuchung des Umschaltprozesses wurde eine Steuermethode vorgeschlagen, welche die indirekte Bestimmung der Lage des Ankers und die Größe der Ankerendgeschwindigkeit in Echtzeit aus der Stromänderung und der induzierten Spulenspannung ermöglicht und somit eine Einwirkung auf den Umschaltprozess unter Berücksichtigung aller destabilisierenden Faktoren erlaubt.

Die Steuermethode beruht darauf, dass Änderungen des magnetischen Flusses im Magnetkreis während der Ankerbewegung in der Spule eine Selbstinduktionsspannung hervorrufen, die von der Strom- und Lageänderung abhängt und die zu einer Änderung des Stromes in der Steuerspule führt (1),(2),(3).

$$U(t) = i(t) \cdot R + \frac{d\Psi(x(i), i(t))}{dt} \quad (1)$$

$$U(t) = i(t) \cdot R + \frac{\partial \Psi(x, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi(x, i)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

$$U(t) = i(t) \cdot R + U_1 \left(\frac{di}{dt} \right) + U_2 \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (3)$$

Diese induzierten Spannungen führen zu einem „Einbruch“ in der Stromkurve ΔI in der Annäherungsphase des Ankers an das Ankergegenstück (Bild 1). Je größer ΔI ist, umso höher ist die Ankerendgeschwindigkeit. Eine Minimierung des „Stromeinbruches“ durch Änderung der zeitlichen Parameter der Steuerimpulse (PWM), führt zu einer deutlichen Absenkung der Ankerendgeschwindigkeit. Für die Realisierung der Steuermethode muss eine dynamische Sollstromkurve gebildet werden, wie sie in Bild 1 dargestellt wird. Die charakteristischen Parameter der Sollstromkurve zu den Zeitpunkten t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 werden bestimmt durch die gegebenen dynamischen Eigenschaften des Antriebes. Hierbei wird im Zeitintervall, in dem der Fangprozess statt findet, $t_F = t_5 - t_3$ versucht einen konstanten Fangstrom durch pulswerten-modulierte Spannungsimpulse einzustellen.

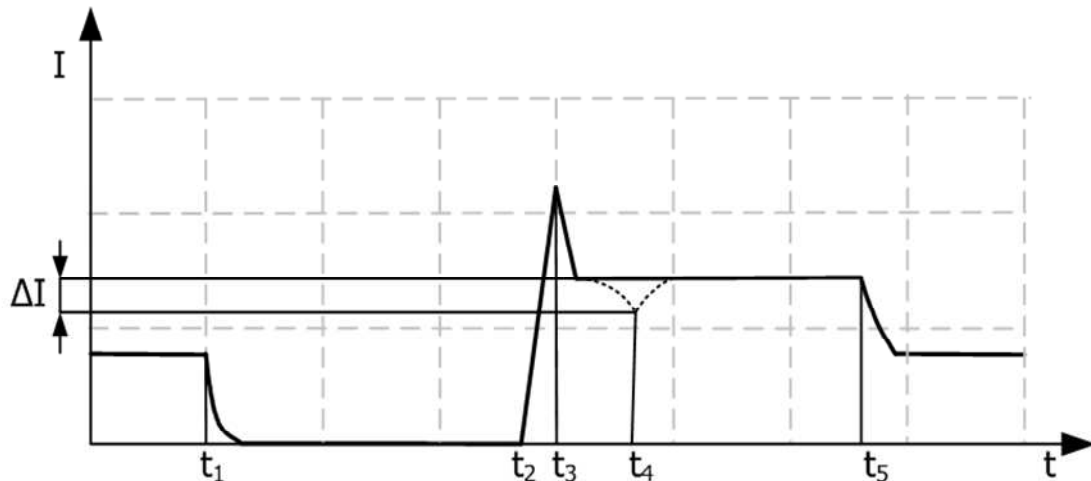


Bild 1: Geforderte dynamische Charakteristik des Spulenstromes (punktiert unter Berücksichtigung der Ankerbewegung); t_1 - t_2 – Strompause, t_2 - t_3 – Dauer der Stromforcierung, t_3 - t_5 – Dauer der Einprägung des Fangstromes, t_1 - t_4 – Ankerbewegungszeit

Im Zeitintervall $t < t_1$ fließt in der Spule der Haltestrom I_H , der notwendig ist, um den Anker in einer der beiden Rastpositionen zu fixieren. Zum Zeitpunkt t_1 wird der Haltestrom I_H abgeschaltet, wodurch sich der Magnetanker, bei Vernachlässigung der Abfallverzugszeit, durch Einwirkung der Feder, zu bewegen beginnt. Zum Zeitpunkt t_2 wird auf die Spule des fangenden Pols des Magnetaktors ein forcierender Spannungsimpuls gegeben, damit ein Anzugsstrom erzeugt wird, der zur Kompensation der mechanischen Kräfte auf den bewegten Anker notwendig ist. Im weiteren wird für den Zeitraum t_F der Fangstrom I_F in der Spule ausgeprägt, während dessen Einwirkungszeit der Anker sich dem Pol nähert und anlegt.

Zur Einschätzung der Realisierungsmöglichkeit und der Effektivität der vorgeschlagenen Steuermethode wurde eine mathematische Modellierung zur Untersuchung des Einflusses des „Stromeinbruches“ ΔI auf die Ankerendgeschwindigkeit v_A (Bild 2) vorgenommen. Die Modellierung erfolgte mit Hilfe des Programmpakets „PSpice“[4]. Wie aus den berechneten Strom- und Geschwindigkeitskurven (Bild 2) ersichtlich ist, führt eine Verringerung der Größe ΔI von 2,4A auf 0,3A zu einer Verringerung der Ankerendgeschwindigkeit v_A von 0,8 auf 0,3 m/s.

Die Umgebungstemperatur hat über die Eigtemperatur des EMA einen bedeutenden Einfluß auf die elektrischen Parameter und die Federsteifigkeit und führt zu einer Veränderung der Eigenfrequenz des Schwingungssystems des Antriebes. In Bild 3 sind die simulierten Geschwindigkeitsverläufe $v(t)$ des Ankers bei verschiedenen Federsteifigkeiten dargestellt. Mit wachsender Federsteifigkeit kann, wie die

Geschwindigkeitskurve 3 in Bild 3 zeigt, ein sicheres Fangen des Ankers bei konstanten Steuerparametern nicht mehr realisiert werden. Ein sicheres Fangen des Ankers bei sich ändernder Federsteifigkeit ist nur dann gewährleistet, wenn man auf die sich ändernde Flugzeit $t_4 - t_1$ und die Stromeinbruchstiefe ΔI adaptiv reagiert.

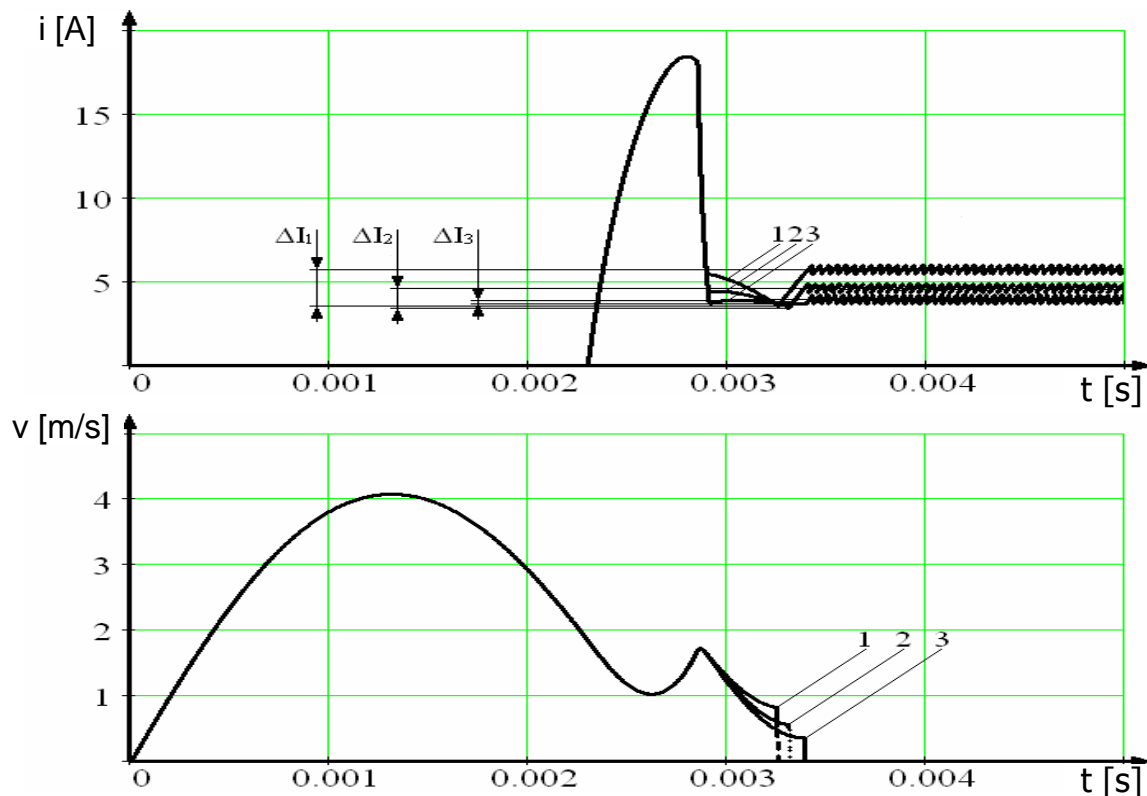


Bild 2: Einfluß des Fangstromes I_F auf die Ankerendgeschwindigkeit und damit auf die Tiefe des „Stromeinbruches“ ΔI ; 1 – $I_F = 5,7\text{A}$, 2 – $I_F = 4,7\text{A}$, 3 – $I_F = 3,9\text{A}$

Bei der Steuerung der Parameter der Stromfunktion in der Spule (Bild 4) ist die Abfallverzugszeit des Ankers t_{21} zu berücksichtigen, die von der Größe der Wirbelströme im Magnetkreis abhängt. Beim Lösen des Ankers, entsteht in der Spule des Pols, an welchem der Anker anlag, eine Induktionsspannung, aus welcher eindeutig die Abfallverzugszeit des Ankers t_{21} ablesbar ist (Bild 4).

Somit ist zur Kompensation der äußeren Störgrößen auf die Dynamik des EMA und zur Regelung der Ankerendgeschwindigkeit eine Korrektur des Zeitintervalls Strompause $t_P = t_2 - t_1$ und des Wertes des Fangstromes im Zeitintervall t_F (Bild 1) in Abhängigkeit von der Veränderung der Abfallverzugszeit t_{21} , der Bewegungszeit t_B sowie des „Stromeinbruches“ ΔI notwendig.

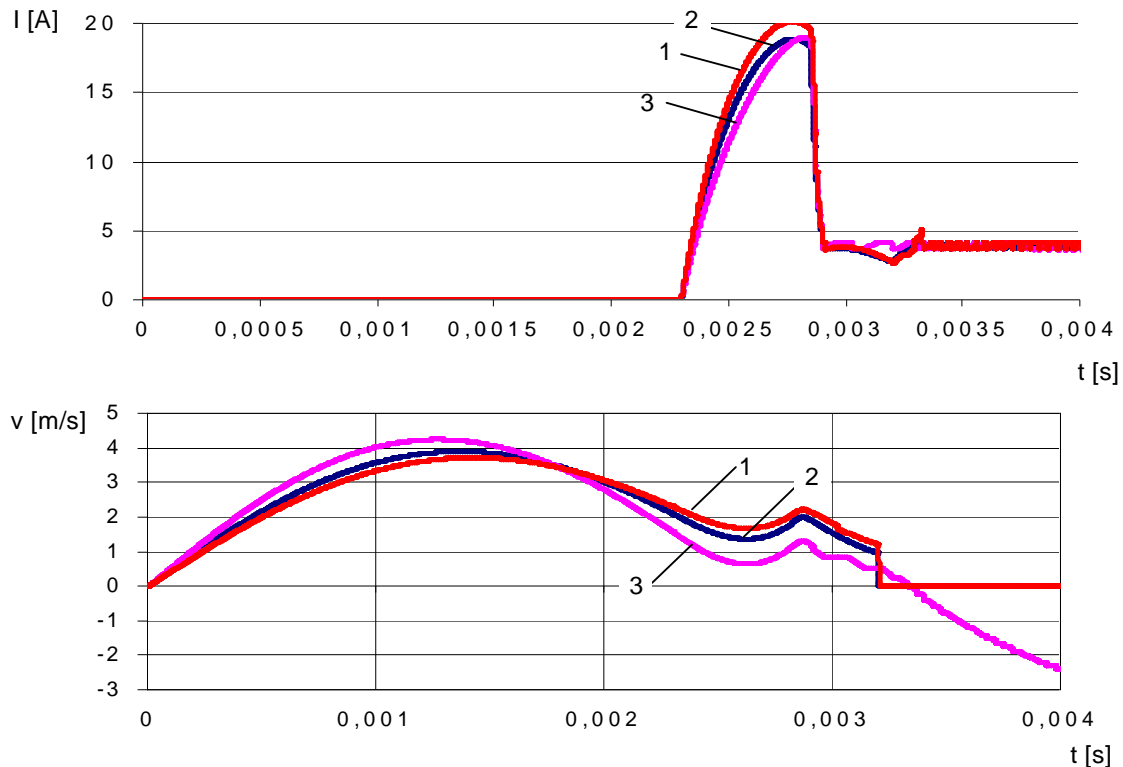


Bild 3: Einfluß der Änderung der Federsteifigkeit auf die „Stromeinbruchstiefe“ ΔI , die Bewegungszeit t_B und die Ankergeschwindigkeit $u(t)$ (1 – entspricht einer Federsteifigkeit von $c = 4,89$ N/grad, 2 – $c = 5,33$ N/grad, 3 – $c = 6,22$ N/grad).

Im Allgemeinen sieht der Algorithmus zur adaptiven Steuerung eines EMA mit steuerbaren Rasten wie folgt aus. Als Ausgangswerte für die erste Umschaltung werden benötigt: die Anzahl der Anschwingimpulse n , die Abhängigkeit der Stromänderung $i(t)$, ermittelt durch die Analyse der gegebenen dynamischen Charakteristik (Bild 1), die Bewegungszeit des Ankers t_B , der minimale Wert des Fangstromeinbruchs $\Delta I_{F.min}$ im Moment des Anlegen des Ankers am Ankergegenstück, bei der der Anker garantiert angezogen und gehalten wird. Beim Einschalten des EMA generiert das Steuersystem eine Anschwingimpulsfolge abwechselnd für jede Spule. Die Impulsperiode entspricht der Eigenfrequenz des mechanischen Systems des EMA. Zum Umschalten des Ankers in die gegenüberliegende Raststellung wird der Haltestrom in der festhaltenden Spule abgeschaltet und es erfolgt eine Messung der sich ändernden Spulenspannung. Mit dem Zeitpunkt der Vorzeichenänderung der Ableitung der Spulenspannung dU_{SP}/dt wird die Abfallverzugszeit des Ankers ermittelt. Findet keine Vorzeichenänderung der zeitlichen Ableitung der Spulenspannung statt, befindet sich der Anker im Mittelstellungsbereich und eine weitere Funktion des Antriebes ist nur nach einem Wiederanschwingen des Ankers bei gleichzeitiger Erhöhung des Fangstromes I_F um

10% oder, nach dem Anschwingvorgang, durch eine Erhöhung der Anzahl der Anschwingimpulse n bis zum Anlegen des Ankers an einem der Pole, möglich. Zum Fangen des Ankers erzeugt die Steuereinrichtung pulsweiten-modulierte Spannungsimpulse an der fangenden Spule des gegenüberliegenden Pols, die der geforderten Stromänderungsfunktion entsprechen und führt die Messung des Stromes in Echtzeit durch. Aus der Abweichung des Stromes ΔI_F vom Wert des Fangstromes I_F und dem Vorzeichenwechsel der Ableitung des Stromes von negativ nach positiv (zu diesem Zeitpunkt legt der Anker am Ankergegenstück an) wird die Bewegungszeit des Ankers t_B bestimmt. Bei Abweichungen der Bewegungszeit des Ankers t_B zu der Bewegungszeit t_{B_i} des vorangegangenen Umschaltvorganges erfolgt eine Korrektur der Strompausenzeit wie folgt: $t_p = t_p - (t_{B_i} - t_B)$. Der Fangstrom für jede Umschaltung wird nach folgender Formel korrigiert: $I_F = I_F + (\Delta I_{Fmin} - \Delta I_F) \cdot k$. Dabei ist k der Verstärkungskoeffizient für die Abweichung vom Fangstrom ΔI_F von ΔI_{Fmin} .

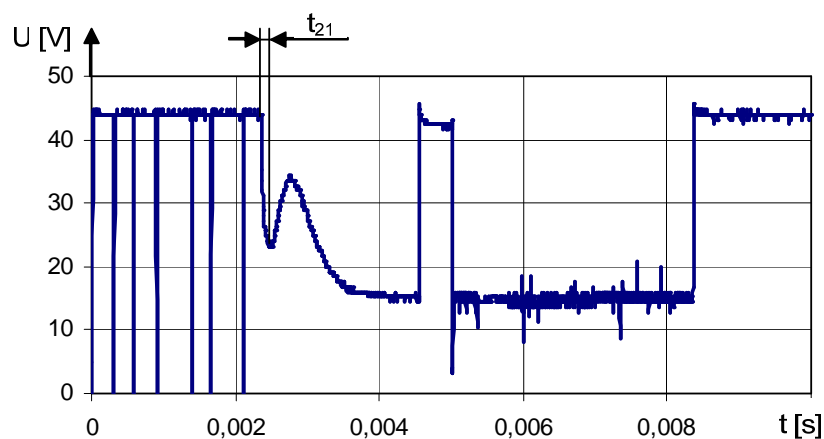


Bild 4: Bestimmung der Abfallverzugszeit t_{21} ; $U(t)$ – Spannung an der Spule

Somit erfolgt bei jeder Umschaltung eine Kontrolle der Antriebsparameter und eine Korrektur der Parameter der pulsweiten-modulierten Steuerimpulse zur Gewährleistung einer sicheren Arbeitsweise und zur Steuerung der Ankerendgeschwindigkeit. Als Ergebnis der Untersuchungen wurde ein Versuchsmuster eines Steuergerätes für EMA mit steuerbarer Rast aufgebaut und der vorgestellte Algorithmus, dessen Struktur in Bild 5 dargestellt ist, realisiert.

Ausgangsparameter für das Steuergerät ist die optimale Stromfunktion $i_{opt}(t)$ in der Spule, die durch mathematische Modellierung unter Berücksichtigung der vorgegebenen dynamischen Charakteristika des Antriebes ermittelt wurde. Während des Umschaltvorganges des Antriebes ermittelt der Microcontroller laufend die Werte des Spulenstromes $i(t)$ und der Spulenspannung $u(t)$. Aus diesen Werten werden die zu steuernden Größen t_B , t_p und ΔI_F bestimmt und, bei entsprechenden Abweichungen,

werden die Parameter des Spulenstromes korrigiert.

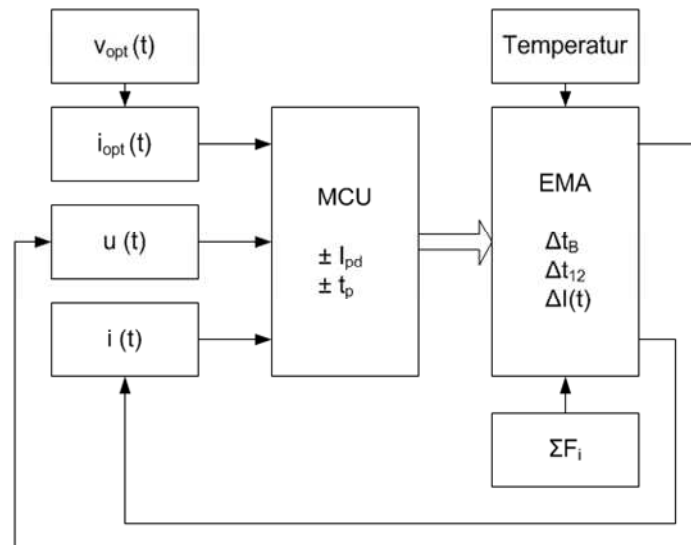


Bild 5: Strukturbild der Steuereinrichtung ($v_{opt}(t)$ - optimale Ankergeschwindigkeit; $i_{opt}(t)$ - optimale Stromänderungsfunktion in der Steuerspule; $i(t)$, $u(t)$ – gemessene Strom- und Spannungswerte; I_{pd} , t_p - zu variiierende Parameter; Temperatur, F - äußere Störgrößen; MC - Steuereinrichtung; EMA - elektro-magnetischer Antrieb.

Die Steuerung wurde auf der Basis des Mikrocontrollers der Firma freescale 56F8323, das Leistungsstellglied mit Leistungs-MOSFET realisiert. Die Schaltung des Leistungsteils mit Erzeugung einer 45V Zwischenkreisspannung zur Forcierung des Stromes, zeigt Bild 6.

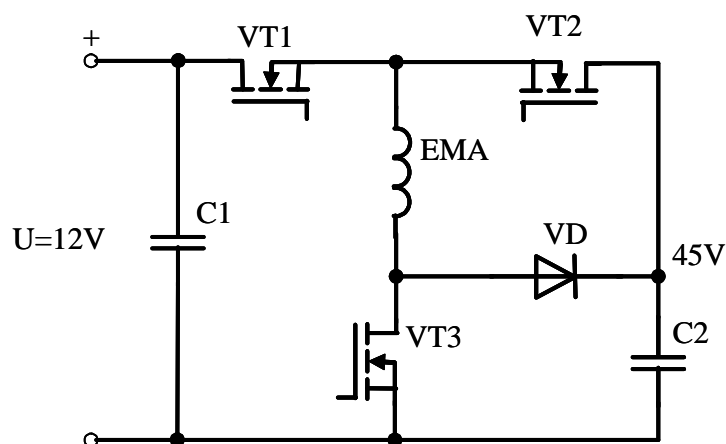


Bild 6: Leistungsstellglied des Steuersystems

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des „Stromeinbruches“ auf die Ankerendgeschwindigkeit zeigt Bild 7. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die theoretischen Beschreibungen das System richtig wiedergeben.

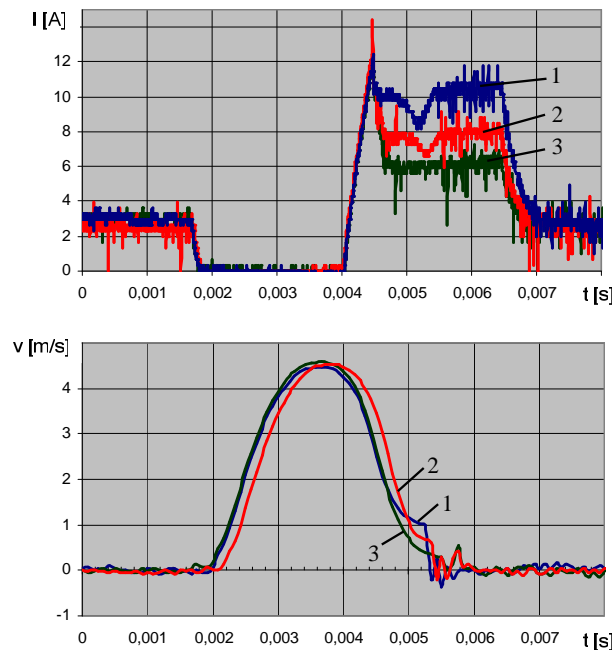


Bild 7: Experimentelle Untersuchung des Steueralgorithmus

References:

- [1] Kallenbach, E.; Ströhla, T.; Birli, O.; Feindt, K.; Kallenbach, M.: Configuration in the Mechatronic Design Process – Represented by Fast Acting Magnetic Actuators. In: Billingsley, J. (Hrsg.): Mechatronics and Machine Vision. Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press LTD., 2000. – ISBN 0-86380-261-3
- [2] Павленко А.В., Гринченков В.П., Беляев Н.П., Гуммель А.А. Анализ и синтез быстродействующих электромагнитных приводов мехатронных систем. Изв. вузов. Сев. – Кавк. регион. Техн. науки. – 2003. – Спецвып. Проблемы мехатроники – 2003. – С. 21-24.
- [3] Павленко А.В., Гринченков В.П., Гуммель А.А. Синтез параметров управляющих сигналов быстродействующего интегрированного электромагнитного привода. Изв. вузов. Сев. – Кавк. регион. Техн. науки. – 2005. – Спецвып. Проблемы мехатроники – 2004. – С. 57-60.
- [4] A.V. Pavlenko, V.P. Grinchenkov, N.P. Belyaev, A.A. Gummel, D.V. Batishchev, E. Kallenbach Mechatronischer Entwurf schnellwirkender electromagnetischer Actoren. 50 IWK, 19.- 23.09.2005 TU Ilmenau.
- [5] Павленко А.В., Гринченков В.П., Беляев Н.П., Колпахчян П.Г., Батищев Д.В., Гуммель А.А., Медведев В.В. Математическое моделирование электромагнитных систем с использованием PSpice. Изв. вузов. Сев. – Кавк. регион. Техн. науки. — 2004. – С. 45-48.
- [6] Dingelstadt, R.; Elsässer, A.; Schilling, W.; Schmidt, J.; Kallenbach, E.; Beyer, F.; Baumbach, J.; Otto, R.; Kucera, U.: Modellbasierte Optimierung von Magnetantrieben für Lufttaktventile. In: Mechatronik 2005 – Innovative Produktentwicklung.

VDI-Berichte 1892.2

Authors:

Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Kallenbach, Dipl.-Ing. Jens Baumbach
Steinbeistransferzentrum Mechatronik Ilmenau, Werner-von-Siemens-Str. 12
D – 98693 Ilmenau
Phone: +49 (0) 3677 4627 - 0
Fax: +49 (0) 3677 4627 - 11
E-mail: eberhard.kallenbach@stz-mtr.de

Prof. Dr.-Ing. habil. A. W. Pavlenko., Dr.-Ing. W. P. Grinchenkow, Dipl.-Ing. A. A. Gummel
Süd-Russische Staatliche Technische Universität (Polytechnisches Institut Novotscherkassk) SRSTU (NPI), Prosveschenija 132,
346428 Novotscherkassk, Rostower Gebiet, Rußland Phone:
Phone: +007 (86352) 55 4 58, +007 (86352) 55 1 13
Fax: +007 (86352) 42056
E-mail: eema@eema.srstu.novoch.ru